

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ОБМОТОК БЕТАТРОНОВ С ОГРАНИЧЕННЫМ ЧИСЛОМ ЦИКЛОВ НАГРЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ

В.Е. Юхнов

Томский политехнический университет

E-mail: elf@tpu.ru

Получены оценочные зависимости для расчета нестационарных температурных режимов обмотки бетатронов с ограниченным числом циклов нагрева и охлаждения.

Знание температурного поля максимально нагруженного элемента позволяет в первом приближении судить о тепловом состоянии электромагнита. Это дает возможность решить вопрос о целесообразности дальнейшей проработки одного из вариантов электромагнита на стадии проектирования.

Задача сводится к отысканию распределения температуры в охлаждаемом стержне конечной длины, внутри которого действует переменный во времени источник теплоты. Интенсивность последнего линейно зависит от температуры. Система уравнений, описывающая процесс теплопроводности, имеет вид

$$\frac{\partial \theta_{n,o}}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta_{n,o}}{\partial X^2} - \beta_{n,o}^2 \theta_{n,o} + Po_1(Fo), \quad 0 < X < 1, Fo > 0,$$

где

$$Po_1(Fo) = \begin{cases} Po_1, & 0 \leq Fo \leq Fo_n, \\ 0, & 0 \leq Fo \leq Fo_o, \end{cases}$$

$$\frac{\partial \theta_{n,o}(0, Fo)}{\partial X} - Bi \theta_{n,o}(0, Fo) = 0;$$

$$\frac{\partial \theta_{n,o}(1, Fo)}{\partial X} + Bi \theta_{n,o}(1, Fo) = 0.$$

Начальные условия

$$\theta_{n,1}(X, 0) = \theta_0, \quad \theta_{n,N}(X, 0) = \theta_{o,N-1}(X, Fo_o),$$

$$\theta_{o,N}(X, 0) = \theta_{n,N}(X, Fo_n).$$

Здесь $\theta_{n,o} = (T_{n,o}(x, \tau) - T_{\text{ж}})/T_0$, $\theta_{\text{ж}} = (T_{\text{ж}} - T_0)/T_0$ – безразмерные температуры; $Po_0 = q_{\text{в}} h^2 / (\lambda T_0)$ – число Померанцева; $Po_1 = Po_0(1 + k\theta_{\text{ж}})$ – модифицированное число Померанцева; $Fo = \lambda \tau / (c_p \rho h^2)$ – число Фурье; $Bi = \alpha h / \lambda$ – число Био; $q_{\text{в}}$ – постоянная составляющая интенсивности внутренних источников теплоты, Вт/м³; $X = x/h$ – безразмерная координата; h – характерный геометрический размер, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c_p – коэффициент теплоемкости, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; τ – время, с; α – коэффициент теплообмена на охлаждаемой поверхности, Вт/(м²·К); $k = \gamma T_0$ – безразмерный температурный коэффициент активного омического сопротивления; $\gamma = 1/(235 + T_0)$ – температурный коэффициент сопротивления, 1/К; $T_{\text{ж}}$, T_0 – температуры охлаждающей среды и активного элемента перед первым циклом нагрузки, °С; $\beta_n^2 = \beta_o^2 - kPo_0$, $\beta_o^2 = BiUh/F$ –

безразмерные коэффициенты, учитывающие теплообмен от боковых поверхностей активного элемента; U , F – периметр и сечение активного элемента; N – номер цикла; индексы «н» – нагрузка, «о» – пауза-охлаждения.

Используя стационарные профили температур и метод коллокаций [1] получены приближенные решения данной задачи. В качестве точки коллокации была использована координата максимальной температуры $X=0,5$. Теплообмен между поверхностью обмотки и окружающей средой превосходит джоулевы потери. Окончательное распределение температур в твэле для прерывистого температурного режима с ограниченным числом повторений нагрева и охлаждения имеет вид:

В период токовой нагрузки $[0, Fo_n]$, $N \geq 1$,

$$\theta_M(X) - \theta_{n,N}(X, Fo) = B(X)T_1(Fo),$$

здесь

$$\theta_M(X) = \frac{Po_1}{\beta_n^2} B(X) \neq \theta_{\text{доп}}$$

является стационарной составляющей температуры,

$$B(X) = 1 + (n_{n,o}^2 - 1) \operatorname{ch}[\beta_n(0,5 - X)],$$

$$n_{n,o}^2 = 1 - Bi \left(Bi \operatorname{ch} \frac{\beta_{n,o}}{2} + \beta_n \operatorname{sh} \frac{\beta_{n,o}}{2} \right)^{-1},$$

$$T_1(Fo) = \frac{Po_1}{\beta_n^2} \exp\left(-\frac{\beta_n^2}{n_n^2} Fo\right) - \left\{ \frac{Po_1}{\beta_n^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta_n^2}{n_n^2} Fo_n\right) \right] M_1(Fo_n, Fo_o) \times \right. \\ \left. \times \exp\left(-\frac{\beta_o^2}{n_o^2} Fo_o\right) + \theta_0 \exp[-(N-1)m_1] \right\} \exp\left(-\frac{\beta_n^2}{n_n^2} Fo\right),$$

$$m_1 = \frac{\beta_n^2}{n_n^2} Fo_n + \frac{\beta_o^2}{n_o^2} Fo_o,$$

$$M_1(Fo_n, Fo_o) = \frac{1 - \exp[-(N-1)m_1]}{1 - \exp(-m_1)}.$$

В период паузы – охлаждения $[0, Fo_o]$, $N \geq 1$,

$$\theta_{o,N}(X, Fo) = \theta_{n,N}(X, Fo_n) \exp\left(-\frac{\beta_o^2}{n_o^2} Fo\right).$$

Таким образом, полученные формулы позволяют оценить конкретный тепловой режим обмотки электромагнита с ограниченным числом циклов нагрева и охлаждения, если обмотка его является самым нагруженным в тепловом отношении элементом.

Непрерывная работа бетатрона возможна, если стационарная составляющая температуры меньше допустимой температуры для данного класса электрической изоляции. В противном случае следует перейти к прерывистой работе с периодом токовой нагрузки τ_n и чередованием паузы τ_o .

На конкретном примере проведена оценка температурного режима обмотки бетатрона типа ПМБ-6 с решетчатым полюсом [2]. На рисунке приведены результаты расчета максимальной температуры медной обмотки бетатрона.

Наибольшая величина отклонения максимальной температуры, рассчитанной по приближенному решению, достигает 10 % в течение первого цикла нагрева и охлаждения. В последующих циклах эта величина не превышает 4 %. Полученное таким образом решение позволяет провести исследования температурного режима этой обмотки в широком диапазоне изменения геометрических и электрофизических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций. — М.: Высшая школа, 2005. — 430 с.
2. Ким М.В., Логинов В.С., Шилин Г.Ф., Чахлов В.Л., Ярушкин Ю.П. Электромагнит переносного бетатрона, питаемый

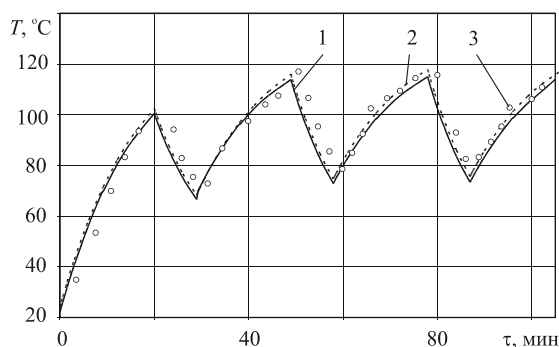


Рисунок. Изменение во времени максимальной температуры обмотки бетатрона в точке $X=0,5$: 1) точное аналитическое решение; 2) приближенный расчет; 3) опытные данные [3]

Вывод

Впервые получены приближенные зависимости для расчета нестационарной температуры в обмотке бетатрона с ограниченным числом циклов нагрев — охлаждение. Они могут быть использованы только для оценки теплового состояния электромагнитных устройств, у которых удельные электрические потери в магнитной цепи значительно меньше, чем в обмотке. Расчетные зависимости проверены сравнением с опытными данными из литературы.

током повышенной частоты // Приборы и техника эксперимента. — 1970. — № 5. — С. 15–18.

3. Логинов В.С. Исследование температурных режимов электромагнитов бетатронов: Дис. ... канд. техн. наук. — Томск, 1973. — 251 с.

Поступила 20.12.2006 г.